



TITLE:

Data-driven analysis of wind power and power system dynamics via Koopman mode decomposition (Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Johan, Fredrik Raak

CITATION:

Johan, Fredrik Raak. Data-driven analysis of wind power and power system dynamics via Koopman mode decomposition . 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20705>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-09-22に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	Johan Fredrik Raak
論文題目	Data-driven analysis of wind power and power system dynamics via Koopman mode decomposition（クープマンモード分解による風力ならびに電力系統ダイナミクスのデータ駆動型解析）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、クープマンモード分解（Koopman Mode Decomposition：KMD）と呼ばれる非線形力学系のクープマン作用素に基づく時系列データ分解法を用いた、風力ならびに電力系統ダイナミクスの解析に関する一連の研究をまとめたものである。本論文は以下の 10 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、KMD の理論の概要を述べると共に、本手法の適用対象とする風力ならびに電力系統の概要についてまとめ、研究の目的を述べている。</p> <p>第 2 章はクープマン作用素のスペクトルに基づき、KMD の理論および解析法をまとめている。KMD は非線形力学系に定義される無限次元線形作用素であるクープマン作用素に基づく。その左随伴であるペロン-フロベニウス（Perron-Frobenius）作用素との関係および、クープマン作用素の離散スペクトル（固有値）、固有関数、スペクトル分解を示し、このスペクトル分解に由来する有限次元の固有モードに実データが分解できることを述べている。合わせて KMD の数値計算アルゴリズムであるアーノルディ（Arnoldi）型アルゴリズムをダイナミックモード分解（Dynamic Mode Decomposition：DMD）のアルゴリズムと比較し検討している。</p> <p>第 3 章は、電力系統ならびに風力の種々の時系列データに基づき、KMD アルゴリズムの適用性を評価している。具体的には、サンプリング周波数ならびにサンプル数が KMD アルゴリズムの適用結果に与える影響を定量的に評価し、KMD アルゴリズムの統一的な表現を介して、その定量的評価の数学的解釈を与えた。さらに、サンプル数と比較してデータの変量の個数が少ない場合、すなわち空間的に低次元の時系列データに対しては、ベクトルブローニ（Prony）アルゴリズムが DMD よりも適していることを示した。</p> <p>第 4 章は、これまでの解析法を適用する風力発電モデルの基本事項をまとめている。ここでは、風力タービンの基礎方程式の概要を述べるとともに、多数の風力タービンから構成される洋上風力発電所のダイナミクスを気象シミュレーションデータと組み合わせることで数値的に評価した例を与えている。</p> <p>第 5 章は、茨城県神栖市沿岸に建設された洋上風力発電所の実測データを用いて、風力タービンから得られる電氣的出力の短時間変動を評価している。そして、風力タービンの電氣的出力変動の変動要因が、風況に加えて風力タービンにおけるエネルギー変換機構にあることを統計的に明らかにした。さらに、多数の風力タービンを接続した風力発電所に上の評価を適用し、発電所の電氣的出力変動が風力タービンに比べて緩和され得ることを示した。</p> <p>第 6 章は、日本広域における風力発電出力のダイナミクスについて、CReSS（Cloud-Resolving Storm Simulator）と呼ばれる雲解像モデルのシミュレーションデータ、ならびに上記の洋上風力発電所における実測データに基づく解析を扱っている。シミュレーションデータは、空間解像度 2km の日本全域を含むデータと、空間解像度 200m のデータからなる。シミュレーションと実測を比較することにより、風力発電出力の数時間スケールの変動が CReSS により評価可能であることが明らかとなった。さらに、風速スペクトルが短時間ならびに長時間スケールにおいて類似性を有することが見いだされ、数 km の空間スケールにおいてスペクトル・コヒーレンス（Spectral Coherence）が CReSS により評価可能であることが示された。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	Johan Fredrik Raak
<p>第 7 章は、日本広域における風力発電出力の平滑化効果を、CReSS による風速予測シミュレーションデータに基づき検討している。ここでは、KMD を用いた新しい平滑化の指標を提案している。これは従来のパワースペクトル密度に基づく指標を一般化したものである。この提案指標により、複数の風力発電所立地に対する平滑化効果を予測データに基づいて評価し、異なる立地の風力発電所の出力を組み合わせることにより平滑化効果が改善される結果を得るとともに、立地の組み合わせにより特定の時間スケールにおいては平滑化効果が改善され得ないことが明らかになった。これより、風力発電所の組み合わせを提案指標により適切に設計することが、所望の平滑化効果を得る上で重要という知見を得た。</p> <p>第 8 章は、風速に関する数秒オーダーの短時間予測に KMD を適用した結果を述べている。茨城県神栖市沿岸の洋上発電所において実測された風速データと風力タービンの出力電力データを評価に用いている。クープマン作用素ならびに KMD が従来の非線形時系列予測法や自己回帰モデルと関連していることを示した上で、KMD に基づく短時間予測が従来法と比較して良好な結果を得ることを示した。これは、風力タービンにおける高効率エネルギー変換に必要な最大電力点追従制御に適用可能な結果である。</p> <p>第 9 章は、電力システムのセキュリティに関わる問題に KMD の適用を試みている。対象とする電力システムのダイナミクスに関する時系列データに KMD を適用し、その結果に基づくことで電力システムの分割パターンを決定することを提案している。このためのデータ駆動型アルゴリズムを整備し、グラフ・ラプラシアン（Graph Laplacian）に基づく代数的グラフ理論、および発電機の緩やかな時間応答を抽出するスロー・コヒーレンシ（Slow Coherency）解析と比較した結果、データ駆動型アルゴリズムにより得られる分割パターンは前者と共通の特徴を有することが明らかとなった。さらに、2 種類の系統モデルを用いた検討により、クープマンモードとグラフ・ラプラシアンの固有ベクトルが数値的に類似していることを示し、理論的にも密接に関係していることを明らかにした。また、本アルゴリズムがセキュリティに関わる故障の波及抑制に有効な分割方法を与えることをシミュレーションにより示した。</p> <p>第 10 章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめると共に、今後の研究の展開について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、クープマンモード分解 (Koopman Mode Decomposition : KMD) という非線形力学系のクープマン作用素に基づく時系列データ解析法を用いた、風力ならびに電力系統ダイナミクスの解析に関する一連の結果をまとめたものである。本論文に得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) KMD の数値計算アルゴリズムの包括的な記述を与えるとともに、主要なアルゴリズムの性能評価を電力システムの解析を通して実施し、アルゴリズムの有効性ならびに適用範囲を明らかにした。
- 2) 雲解像モデルに基づく高解像度気象シミュレーション (Cloud Resolving Storm Simulator : CReSS) により得られた風況予測データ及びウィンドファームの実測データに基づき、実用に供されている日本近海の洋上風力発電に関する変動解析を実施した。以上の解析により、洋上風力発電の変動評価に対する CReSS の有効性と限界を明らかにした。
- 3) 風力発電出力の平滑化 (ならし) 効果を定量的に評価するための KMD に基づく新たな評価指標を提案した。そして、CReSS による東日本の風況予測データに本提案指標を適用することにより、当該地域における平滑化効果の評価を実施した。さらに、実測データに基づいて風力原動機 (タービン)・発電機連成系の数式モデルを構築し、数式モデルの風力出力と実測データに対する短時間スケール (1Hz サンプリング) の統計的評価を行った。これにより、構築した数式モデルが実測された短期的出力変動を再現することを示した。加えて、KMD を用いた風速の新たな予測方法を提案した。
- 4) 母線電圧位相の時系列データへの KMD に基づいて、電力系統の新たな分割法と保護戦略を提案した。本提案により、電圧位相のダイナミクスを表す数式モデルを用いることなく、ダイナミクスの実測ないしシミュレーションで得られたデータから故障の波及抑制に有効な分割方法を与えることが可能となった。

上記のように、本論文では、KMD を用いることにより、風力ならびに電力系統のダイナミクスをデータから直接解析するための基礎的知見が得られており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 7 月 26 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降